

УДК 621.438

DOI: 10.12737/article_59ae90c6830360.45378807

А.Н. Михайлов, д.т.н.,
В.А. Михайлов, аспирант,
А.В. Байков, к.т.н.
(Донецкий национальный технический университет)
E-mail: mntk21@mail.ru

Комплексное повышение ресурса всех групп лопаток компрессора турбовального ГТД на основе функционально-ориентированного подхода

Выполнен анализ особенностей эксплуатации лопаток компрессора турбовального ГТД. При этом проведено структурирование лопаток компрессора в группы и показано, что структурные группы лопаток работают в различных условиях эксплуатации. Установлено, что различные структурные группы лопаток компрессора имеют свои определенные особенности эксплуатации и эрозийного износа. Показано, что эрозийный износ всех групп лопаток компрессора можно характеризовать неравномерностями трех родов. В работе предложен общий подход в повышении ресурса всех групп лопаток компрессора вертолетного ГТД.

Ключевые слова: авиационный двигатель; лопатки компрессора; группы лопаток; технология; ресурс.

A.N. Mikhailov, D. Eng.,
V.A. Mikhailov, Post graduate student,
A.V. Baikov, Can. Eng.
(Donetsk National Technical University)

Life complex increase of all groups of compressor blades of a turbo-shaft gas turbine engine on the basis of a functionally-directed approach

The analysis of peculiarities in compressor blade operation of the turbo-shaft gas turbine engine is carried out. At the same time the compressor blade structuring into groups is carried and it is shown that structural groups of blades operate under different conditions of operation. It is defined, that different structural groups of compressor blades have their own definite peculiarities of operation and erosion wear. It is shown, that the erosion wear of all groups of compressor blades may be characterized by irregularities of three kinds. In the paper a general approach to life increase of all groups of compressor blades in a helicopter gas turbine engine is offered.

Keywords: aircraft engine; compressor blades; blade groups; technology; life.

В настоящее время, для вертолетов широко используются турбовальные двигатели серии ТВ3-117 и ВК-2500. Они, в основном, применяются для вертолетов следующих типов Ми-24П, Ми-28Н, Ка-32А1, Ка-50 и Ка-52 и других машин. Турбовальные двигатели серии

ТВ3-117 и ВК-2500 являются надежными, компактными и высокоэффективными газотурбинными двигателями (ГТД).

Одной из основных подсистем турбовального двигателя является осевой компрессор. В осевом компрессоре имеется пять различных

групп лопаток. Именно лопатки компрессора [1, 2] являются одним из слабых звеньев вертолетного двигателя, так как они разрушаются одними из первых. При этом процесс эрозионно-абразивного износа лопаток каждого каскада имеет свои определенные особенности. К этим группам лопаток можно отнести следующие виды (в эти группы включены поворотные лопатки входного направляющего аппарата): поворотные лопатки входного направляющего аппарата (ВНА) (1 ступень); поворотные лопатки направляющего аппарата (НА) статора (4 ступени); лопатки направляющего аппарата статора (8 ступеней); лопатки спрямляющего аппарата (1 ступень); лопатки ротора (12 ступеней).

Выполненные исследования особенностей разрушения лопаток компрессора показывают, что главным недостатком разрушений лопаток осевого компрессора при эксплуатации является то, что лопатки разрушаются при эксплуатации неравномерно. А именно происходят следующие явления: каждая лопатка имеет неравномерное разрушение элементов по входной кромке, по периферийной кромке, по задней кромке, по поверхности корыта пера лопатки; неравномерные разрушения происходят по номерам ступеней каждой группы ступеней лопатки, по видам групп лопаток.

Данные исследования проводились для лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117, общий вид которых показан на рис. 1.

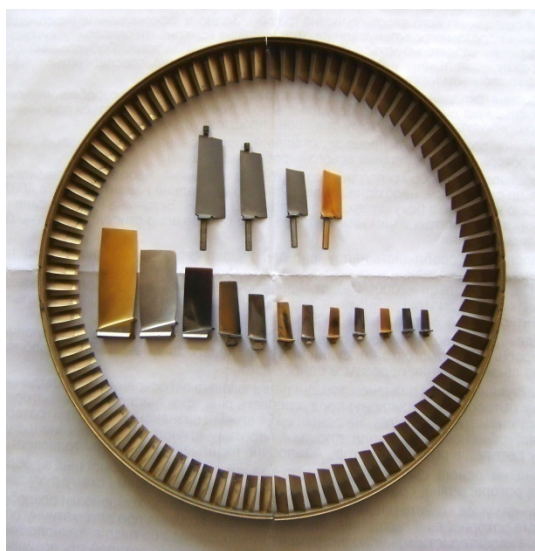


Рис. 1. Общий вид лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117

Для исключения неравномерностей разрушения лопаток и повышения их ресурса необходимо разработать общий подход к повыше-

нию ресурса лопаток компрессора и создать ряд технологических методов, обеспечивающих комплексное повышение ресурса всех ступеней и каскадов лопаток проточной части осевого компрессора.

Рабочий процесс вертолетного турбовально-го двигателя гипотетически соответствует идеальному термодинамическому циклу Брайтона [2] с подводом и отводом теплоты при постоянных давлениях и изоэнтальпическом сжатии и расширении. Для осевого компрессора важнейшим является обеспечение параметров сжатия газоздушного потока проточной части. На практике идеальный цикл всегда отличается от реального термодинамического цикла. На это оказывает влияние целый комплекс различных параметров. Важнейшие из них – это постоянно увеличивающиеся зазоры между лопатками ротора и статора, лопатками ротора и корпусом компрессора и лопатками статора и ротором [3]. С увеличением зазоров проточной части компрессора снижаются все параметры термодинамического цикла. Увеличение зазоров между лопатками и элементами проточной части компрессора происходит в основном из-за эрозионно-абразивного их износа и действия целого комплекса других эксплуатационных воздействий.

Можно отметить, что процесс действия эксплуатационных воздействий потоков среды и возникающих при этом разрушений лопаток компрессора имеет определенные особенности. А именно, этот процесс обусловлен неравномерными действиями на элементы лопатки, на лопатки группы и лопатки входящие в различные виды их групп. Эти особенности неравномерных действий и разрушений можно характеризовать следующими неравномерностями: неравномерность 1-го рода (по элементам лопатки), неравномерность 2-го рода (по номерам ступеней), неравномерность 3-го рода (по видам групп ступеней).

Это приводит к неравномерным разрушениям лопаток осевого компрессора. Неравномерности усложняют процесс применения технологических методов повышения ресурса эксплуатации лопаток компрессора. Вместе с тем, для повышения ресурса лопаток компрессора необходимо рассматривать особенности их разрушения в едином комплексе и из этих условий обеспечивать свойства лопаток комплексно для всего компрессора.

Таким образом, при обеспечении свойств лопаток необходимо учитывать следующие эксплуатационные особенности (рис. 2):

– неравномерные воздействия и разрушения

лопатки в пределах каждой ступени в одноименном виде групп лопаток;
– неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от номера

ступени в одноименном виде групп лопаток;
– неравномерные воздействия и разрушения элементов лопатки в зависимости от вида групп лопаток.



Рис. 2. Виды групп лопаток осевого компрессора ГТД модели ТВ3-117 и особенности их разрушений

Основные виды эксплуатационных воздействий среды на лопатки компрессора ГТД можно представить следующим образом: газоздушный поток с включениями пыли, пепла, песка, абразива и тому подобных частиц; потоки крупных частиц и элементов; ударные, динамические и вибрационные нагрузки; действие различных видов сил и возникающих при этом напряжений изгиба и кручения, растяжения и сжатия, смятия и среза; пар, жидкости, вода, льдинки, снег; кислотные, щелочные, солевые и другие виды воздействий; температурные и другие воздействия; комбинированные воздействия.

На этом множестве эксплуатационных воздействий наиболее значительные, влияющие на увеличения зазоров в проточной части осевого компрессора, являются воздействия первого вида. То есть постоянно действующие эрозионные воздействия мелких частиц пыли, песка и абразива.

Эксплуатационные воздействия приводят к разрушениям лопаток компрессора ГТД, основ-

ные из которых следующие: эрозионные разрушения поверхностного слоя пера лопатки; местные царапины, риски, забоины и вмятины элементов пера лопатки; усталостные и ударные разрушения лопатки от действия различных видов разрушений; излом пера лопатки; коррозионные разрушения поверхностного слоя пера лопатки; разрушения поверхностного слоя от действия кислот, щелочей, солей и других видов воздействий; комбинированные разрушения лопатки.

На практике обычно возникают комбинированные разрушения лопаток. При этом следует заметить, что эрозионно-абразивный износ лопаток наиболее отрицательно влияет на увеличение зазоров в проточной части компрессора, что и снижает эксплуатационные параметры компрессора ГТД.

При этом к основным параметрам, влияющим на возникновение неравномерностей разрушения лопаток в осевом компрессоре ГТД, можно отнести следующие: изменяющаяся пространственная форма лопатки; изменяющаяся

пространственная структура лопаток по длине осевого компрессора; изменяющиеся параметры проточной зоны компрессора; изменяющиеся параметры потока среды в проточной части компрессора; особенности кинематики лопаток компрессора.

Следует учитывать то, что на возникновение неравномерностей разрушений пера лопатки влияет изменяющаяся пространственная структура лопаток по длине осевого компрессора [2 – 4]. Эти особенности существенно зависят от следующего: количества лопаток в ступени и их пространственного расположения; количества ступеней в группе и их пространственного расположения; количества видов групп и их пространственного расположения.

Кроме того, возникновение неравномерностей разрушений пера лопатки обусловлены изменяющимися параметрами проточной зоны компрессора: геометрическими параметрами; параметрами зазоров проточной зоны [3]; структурой зазоров и полостей проточной зоны. Более того, возникновение неравномерностей происходит из-за изменяющихся параметров потока среды в проточной части компрессора, которые определяются: параметрами размеров, структуры и концентрации частиц потока; скоростью и интенсивностью потока среды; параметрами температуры и особенностями движения потока среды по проточной части компрессора. И наконец, возникновение неравномерностей разрушений лопаток происходит из-за особенностей кинематики лопаток компрессора, определяющих их вращение или неподвижность. В целом, действие этих параметров необходимо учитывать комплексно.

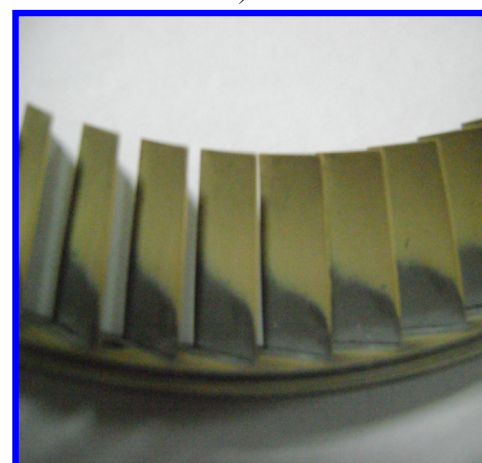
В осевом компрессоре турбовального двигателя наиболее значительно изнашиваются лопатки ротора. Анализ процесса эрозионно-абразивного износа лопаток показывает, что они изнашиваются также и из-за особенностей концентрации частиц пыли в единице объема среды, которая переменна, и может достигать до 6 г/м^3 на последних ступенях компрессора по сравнению с первыми ступенями лопаток компрессора. Эти особенности усложняют процессы эрозионно-абразивного износа элементов пера лопаток по длине проточной части компрессора. Поэтому каждая лопатка определенной ступени имеет свои особенности эрозионно-абразивного износа.

В процессе эксплуатации ГТД лопатки компрессора разрушаются из-за действия эрозионно-абразивного износа. При этом возникают неравномерный износ лопаток, который подразделяется на неравномерности трех родов.

На рис. 3 представлен общий вид эрозионных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117.



а)



б)



в)

Рис. 3. Общий вид эрозионных разрушений лопаток компрессора ГТД модели ТВ3-117:

а – поворотные лопатки НА статора; б – лопатки НА статора; в – лопатка ротора

Анализ особенностей разрушения групп лопаток осевого компрессора (см. рис. 3) показывает, что каждая группа лопаток имеет свои

особенности разрушений, которые определяются неравномерностью 3-го рода. При этом в каждой группе лопатки имеют свои особенности разрушений, которые характеризуются неравномерностью 2-го рода. Если рассматривать конкретную лопатку, то по элементам пера лопатки действуют неравномерности 1-го рода.

Выполненные исследования этих особенно

стей разрушения позволили установить, что процесс разрушений групп лопаток, лопаток по ступеням и конкретно каждой лопатки имеют свои закономерности [4]. Эти закономерности можно представить в виде структурной схемы взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения при эксплуатации, которая показана на рис. 4.

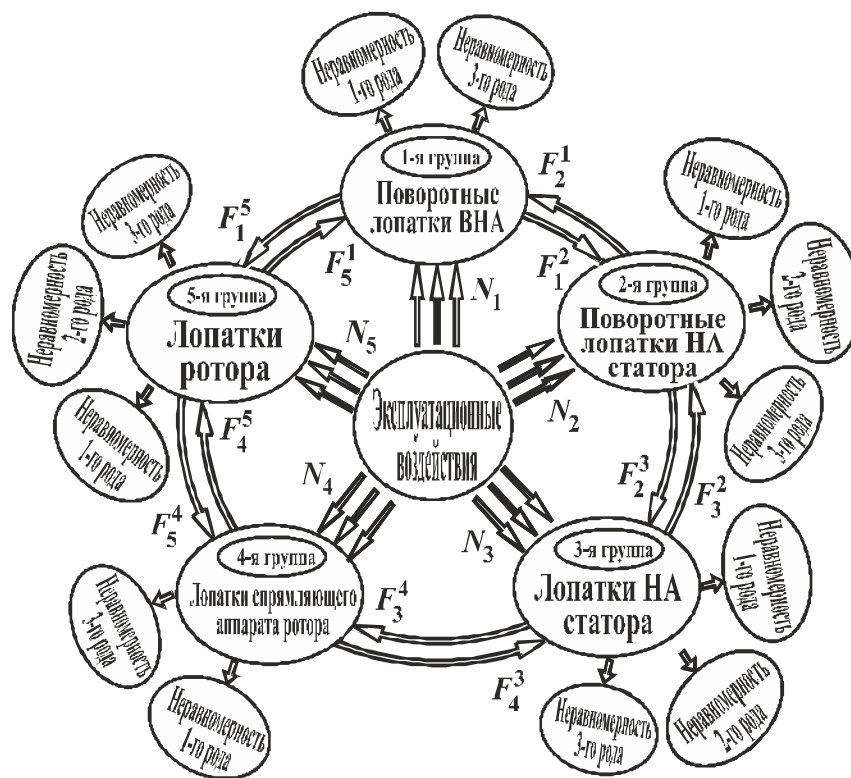


Рис. 4. Структурная схема взаимосвязей различных групп лопаток и возникающих неравномерностей их разрушения

Лопатки осевого компрессора образуют пять различных групп лопаток, на них действуют эксплуатационные воздействия N_1, N_2, N_3, N_4, N_5 каждое из которых характеризуется потоками материи, энергии и информации. Взаимосвязь между особенностями разрушений различных групп лопаток показана с помощью связей F_i^j .

Выполненные исследования особенностей разрушений лопаток компрессора турбовального двигателя вертолета позволили установить, что они имеют определенные особенности. При этом в процессе неравномерного разрушения лопаток действует три рода неравномерностей, которые снижают ресурс лопаток и авиационного двигателя в целом. Для исключения таких неравномерных разрушений лопаток необходимо обеспечивать специальные свойства лопаток компрессора. Однако традиционными технологическими методами решить эти проблемы

не возможно. Здесь необходимы специальные подходы с применением функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [5].

Возникающие неравномерности эрозионно-абразивного износа лопаток не позволяют эффективно применять традиционные методы снижения их износа. Например, при нанесении традиционных нитрид титановых покрытий на перо лопатки ротора повышается только незначительно ресурс лопаток. Это обусловлено тем, что предельные разрушения пера лопатки ротора происходят на передней кромке пера у его периферии. После разрушения покрытия происходит интенсивное разрушение тела пера при отсутствии разрушения поверхности корыта пера лопатки. Это снижает ресурс лопатки в целом, и не позволяет их восстанавливать, в том числе многократно [4].

При обеспечении функционально-ориентированных свойств пера лопатки можно

существенно повысить ресурс лопаток, например, за счет возможности многократного восстановления работоспособности лопаток посредством применения специальных покрытий неравномерной толщины или с неравномерными физико-механическими свойствами, как это выполнено в работе [4].

Для решения вопросов комплексного повышения ресурса лопаток осевого компрессора вертолетного ГТД разработана структурная схема взаимосвязей F_i^j и обеспечения функционально-ориентированных свойств на базе функционально-ориентированных технологий (ФОТ) [5] (рис. 5).

1. $Str \{F, A\}$ – структура, состоящая из двух множеств, а именно множества действующих на элементы лопатки эксплуатационных функций F и множества возникающих между ними связей A .

2. $Str \{P, B\}$ – структура, состоящая из двух множеств, множества составленного из функциональных элементов P множества лопаток компрессора и множества действующего между ними связей B .

3. $Str \{C, G\}$ – структура, состоящая из двух множеств, множества составленного из свойств элементов лопатки C , которые необходимо обеспечить, и множества действующих между ними связей G .

4. $Str \{TB, Q\}$ – структура, состоящая из двух множеств, множества составленного на технологических воздействиях TB , необходимых для

обеспечения свойств, и множества действующих между ними связей Q .

5. Принципы ФОТ [5]. Представленные элементы методики связаны между собой на базе функционально-ориентированных технологии, а именно их принципов.

6. Функционально-ориентированные свойства (ФОС) [5].

7. $Str \{R, D\}$ – структура, состоящая из двух множеств, множества составленного на ресурсах R лопаток компрессора, и множества действующих между ними связей D .

8. $Str \{M, U\}$ – структура, состоящая из двух множеств, а именно множества необходимых методов M для обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток компрессора и множества возникающих между ними связей U .

Анализ структурной схемы взаимосвязей и обеспечения ФОС, позволил установить, что обеспечение свойств лопаток реализуется в едином комплексе на базе функционально-ориентированного подхода, который позволяет реализовывать свойства всех групп лопаток в зависимости от действующих эксплуатационных функций и с учетом неравномерностей трех родов. Это дает возможность комплексно обеспечивать ресурс всех лопаток, реализовывать их предельных эксплуатационный потенциал и существенно повысить технико-экономические показатели эксплуатации вертолетного двигателя.

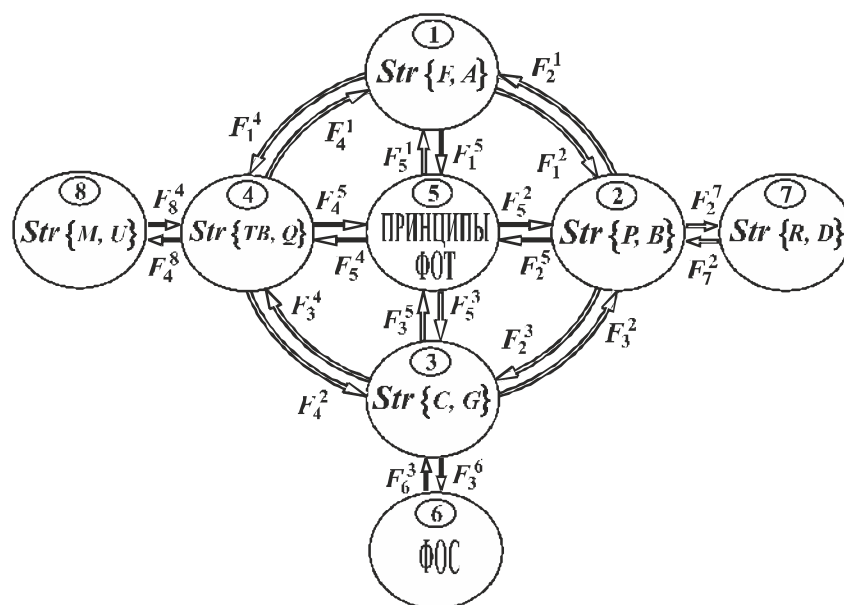


Рис. 5. Структурная схема взаимосвязей и обеспечения ФОС

Одним из перспективных вариантов решения вопроса повышения ресурса лопаток компрес-

сора ГТД, является обеспечение ресурса всех групп лопаток, на основе следующих условий:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$k_{p1}R_{p1} = k_{p2}R_{p2} = k_{p3}R_{p3} = k_{p4}R_{p4} = k_{p5}R_{p5} \rightarrow \max; \quad (2)$$

где R_i – ресурс лопаток i -й группы; R_{pi} – межремонтный ресурс лопаток i -й группы; k_{pi} – количество восстановлений лопаток i -й группы.

Для обеспечения условия (1) или (2) необходимо использовать функционально-ориентированный подход [5]. Это позволяет полностью адаптировать все группы лопаток компрессора к особенностям их эксплуатации и обеспечить их предельный эксплуатационный потенциал [4, 6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авиинформ / Ежемесячный информационно-аналитический журнал. – М.: Международная ассоциация «Союз авиационного двигателестроения», 2016. – Вып. № 4 (145). – 182 с. Что за статья? Авторы??
2. **Вертолетные** газотурбинные двигатели / В.А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и др. – М.: Машиностроение, 2007. – 491 с.
3. **Михайлов, А.Н., Михайлов, Д.А., Грубка, Р.М., Петров, М.Г.** Повышение долговечности деталей машин на базе функционально-ориентированных покрытий // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – №7(49). – С. 30–39.
4. **Михайлов, Д.А.** Основные особенности эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатации-

онных функций / Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. Вип. 4 (50). – С. 121 – 127.

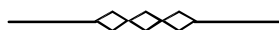
5. **Михайлов, А.Н.** Основы синтеза функционально-ориентированных технологий. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

6. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

REFERENCES

1. Aviainform / Monthly information-analytical journal. – M.: International Association of "Union of Aircraft Engine Manufacturing", 2016. - Issue № 4 (145). – pp. 182.
2. *Helicopter Gas Turbine Engines* / V.A. Grigoriev, V.A. Zrelov, Yu.M. Ignatkin et al. – M.: Mechanical Engineering, 2007. – pp. 491.
3. Mikhailov, A.N., Mikhailov, D.A., Grubka, R.M., Petrov, M.G. Machine parts life increase based on functionally-directed coatings // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – №7(49). – pp. 30–39.
4. Mikhailov, D.A. Basic peculiarities of compressor blades operation in gas turbine engines and classification of their operation functions / *Efficient Technologies and Systems of Mechanical Engineering: Inter. Proceedings*. – Donetsk: DonNTU, 2014. Issue 4 (50). – pp. 121 – 127.
5. Mikhailov, A.N. *Fundamentals of Functionally-directed Technologies Synthesis*. – Donetsk: DonNTU, 2009. – pp. 346.
6. Suslov, A.G. *Technological Support of State Parameters of Parts Surface Layers*. – M.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 208.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров



Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 01.08.2017. Выход в свет 29.09.2017.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16